

DOI: 10.12086/oe.2024.240002

太阳耀光偏振参数星上计算系统设计

李宇豪^{1,2}, 纪峰¹, 裘桢炜², 陈斐楠^{2*}, 厉卓然²,
池杲鋆², 陈晶晶¹, 胡亚东², 李孟凡²

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

²中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要: 太阳耀光影响光学遥感成像质量, 可采用在探测器前加装偏振片的方式进行抑制, 抑制效果取决于太阳和遥感器的相对位置以及偏振片的偏振方向。为实时准确地获取太阳耀光偏振信息, 本文在星载大气校正仪上设计了一套星上太阳耀光偏振参数计算系统, 利用大气校正仪 670 nm 波段的 0°, 60°, 120° 三个通道偏振图像实时计算耀光参数, 并使用基于 6S 大气辐射传输模型的耀光参数建立晴空海洋偏振双向反射分布函数查找表, 排除受云干扰的图像像元, 最后利用实时探测数据进行高精度太阳耀光偏振方位角计算。系统以 V5 系列的现场可编程门阵列为计算平台, 使用高层次综合工具进行算法的硬件实现, 并在实验室内进行了实验验证。实验结果表明, 系统计算偏振角误差与真实值相比在 0.5° 以内, 在 100 MHz 主频时钟下一组 25×25 像元的数据计算时间消耗为 19.47281 ms, FPGA 资源使用率为 41%。

关键词: 太阳耀光; 现场可编程门阵列; 偏振测量; 硬件加速

中图分类号: O436

文献标志码: A

李宇豪, 纪峰, 裘桢炜, 等. 太阳耀光偏振参数星上计算系统设计 [J]. 光电工程, 2024, 51(4): 240002

Li Y H, Ji F, Qiu Z W, et al. Design and implement of a space-borne sun glint polarization parameter computing system[J].

Opto-Electron Eng, 2024, 51(4): 240002

Design and implement of a space-borne sun glint polarization parameter computing system

Li Yuhao^{1,2}, Ji Feng¹, Qiu Zhenwei², Chen Feinan^{2*}, Li Zhuoran², Chi Gaojun², Chen Jingjing¹,
Hu Yadong², Li Mengfan²

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

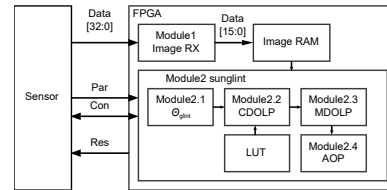
Abstract: Sun glint is a significant confounding factor in passive optical remote sensing images. To mitigate this issue, a polarizer is typically incorporated in front of the remote sensor, leveraging the linear polarization characteristics of sun glint. The suppression effects depend on the relative position of the sun and the remote

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-02-23; 录用日期: 2024-02-26

基金项目: 装备预研项目基金资助项目 (305090306); 江淮前沿技术协同创新中心追梦基金课题资助项目 (2023-ZM01K011)

*通信作者: 陈斐楠, feinan123@aiofm.ac.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所



sensor, as well as the directions of polarizers. In this paper, we introduce a novel onboard system for the real-time computation of Sun glint polarization parameters, devised specifically for a spaceborne atmospheric correction instrument. Utilizing three channel polarization images (at 0°, 60°, and 120°) in the 670 band of the spaceborne atmospheric correction, we calculate the sun glint parameters and compared them against the 6S radiation transfer model, excluding image pixels heavily influenced by the cloud. The system is implemented using the V5 series Field Programmable Gate Array (FPGA) as the hardware platform, and the High-Level Synthesis Tool (HLS) as the software platform. The performance of the system is verified through a simple laboratory experiment, which demonstrates a calculation deviation within 0.5°. In terms of computational efficiency, the system processes a 25x25 pixel dataset in 19.47281 ms using a 100 MHz clock, with the highest resource utilization rate reaching 41%.

Keywords: sun glint; field programmable gate array; polarization measurement; hardware acceleration

1 引言

太阳耀光是太阳光经过水面镜面反射后形成强辐射信号, 其辐射强度通常比离水辐射、白沫辐射等其他辐射信号高出数十倍^[1]。在航空遥感、光学卫星遥感等应用领域, 对太阳耀光区域进行观测时, 太阳耀光会变成强烈的信号干扰源, 导致目标信号在整个辐射背景中的对比度较小, 从而影响有效数据的获取。

当前遥感图像太阳耀光抑制方法主要在地面进行。Wang 等人^[2]提出了一种基于 SeaWiFS 数据的太阳耀光校正方法, 通过对太阳耀光进行建模和计算, 在原始图像中减去太阳耀光信号。然而这种方式针对的是已经被耀光污染的遥感数据, 数据处理的精度依靠模型的适应性, 且原始数据本身的处理需要较大的计算资源。根据太阳耀光的偏振特性^[3-4], Fougne 等人^[5]的研究表明, 加装平行偏振片的方式能够有效地抑制太阳耀光。刘志刚等人^[6]研究了在不同太阳几何和观测几何下, 平行偏振片对太阳耀光的抑制效果。结果显示当观测天顶角较小, 太阳天顶角越大, 抑制效果越好。为了取得更好的抑制效果, Zhao 等人^[7]设计了双角度可调偏振片的探测系统, 在固定平行线偏振片后增加一个角度可调的偏振片, 在抑制耀光 s 分量的基础上, 额外抑制一部分 p 分量, 但在抑制太阳耀光的同时也抑制了有用信号。Avrahamy 等人^[8]证明将偏振片调整至最佳角度有助于抑制太阳耀光。额外使用一台偏振探测器实时获取太阳耀光的偏振信息, 帮助主相机调整偏振片的方向, 提高海洋探测的图像效果。张卫国等人^[9]设计了一套双波段偏振自适应探测系统, 分为偏振成像探测器和成像探测器, 通过偏振成像探测器计算太阳耀光特性, 从而调整成像探测器上的偏振片方向。朱鹤骞等人^[10]使用分焦平面偏

振相机实时探测海面的偏振特性变化, 实时变更偏振片的方向, 并通过时域和空域上的滤波降低耀光的影响。Wang 等人^[11]同样使用分焦平面偏振相机计算太阳耀光的偏振信息, 并分析了计算精度, 其太阳耀光偏振角计算误差在 10% 以内, 最小误差为 3%。

本文在星载大气校正仪^[12]平台上设计了一个太阳耀光偏振参数实时计算系统, 为主相机耀光抑制偏振片提供实时精确的耀光偏振角度参数。大气校正仪采用多光谱偏振方式测量大气中的气溶胶和水汽等参数, 以减少其对高分辨率光学遥感仪器的影响, 进而提升遥感图像的清晰度。大气校正仪是分时检偏的面阵偏振辐射计, 覆盖可见与红外波段的多个光谱通道, 在 490 nm、670 nm、870 nm 与 1610 nm 波段具有偏振探测能力。由于星上硬件资源有限, 故不使用多通道数据进行云掩模和大气环境估算。考虑到先前多台类似载荷在轨测试时各光谱通道定标稳定性的分析, 采用校正仪 670 nm 波段的三个检偏通道计算此波段的偏振辐射的斯托克斯参量, 继而换算为偏振角度。计算程序基于 V5 系列现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 上实时计算目标区域的耀光参数, 用于光学传感器实时调整耀光抑制偏振片角度, 实现耀光快速抑制。

2 设计原理

2.1 偏振特性计算

根据电磁场反射的菲涅尔 (Fresnel) 定律, 可以计算出特定几何条件下的偏振反射系数 $R^p(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ ^[13]:

$$R^p(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{1}{2} \left[-\frac{(\cos \omega - u)^2 + v^2}{(\cos \omega + u)^2 + v^2} + \frac{[(n_r^2 - n_i^2) \cos \omega - u]^2 + (2n_r n_i \cos \omega - v)^2}{[(n_r^2 - n_i^2) \cos \omega + u]^2 + (2n_r n_i \cos \omega + v)^2} \right], \quad (1)$$

$$u^2 = \frac{1}{2} \left[|n_r^2 - n_i^2 + \cos^2 \omega - 1| + \sqrt{(n_r^2 - n_i^2 + \cos^2 \omega - 1)^2 + 4n_r^2 n_i^2} \right], \quad (2)$$

$$v^2 = \frac{1}{2} \left[-|n_r^2 - n_i^2 + \cos^2 \omega - 1| + \sqrt{(n_r^2 - n_i^2 + \cos^2 \omega - 1)^2 + 4n_r^2 n_i^2} \right], \quad (3)$$

$$\cos \omega = \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \sin(\varphi_s - \varphi_v)]}, \quad (4)$$

式中: $n = n_r - in_i$, n_r 为海水的折射系数, n_i 为海水的消光系数; u 和 v 为中间参数, ω 为太阳光线的入射角; θ_s 和 φ_s 为太阳天顶角和太阳方位角, θ_v 和 φ_v 为观测天顶角和观测方位角。天顶角 θ 是指太阳或探测器与观测点的连线与天顶方向的夹角, 范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$, 方位角 φ 是指以观测点为轴心, 观测点的正北方向为起始方向, 顺时针旋转至太阳或探测器到地球表面投影的角度, 范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ^[14]。

然而, 实际海面并不如理想水面那样均匀平整, 其由于波浪的原因会形成众多倾斜角度不一的微小反射表面, 无法直接应用 Fresnel 原理。为解决这一问题, Cox 和 Munk^[15] 采用了统计理论对大量航拍数据进行建模, 建立了实际海表的耀光模型。该模型建立了在不同风速和风向下的表面微元反射方向的概率分布情况, 使得它对于中低分辨率的遥感图像具有良好的适应性。如图 1 所示, 定义一个坐标系 $(P; X, Y, Z)$ 。在该坐标系中, P 点为观测点, PZ 指向天顶, PY 水平方向指向太阳, PX 垂直于面 PYZ 。面 $PABC$ 为倾斜表面, 点 A' 和点 B' 为倾斜表面和面 PXZ 和面 PYZ 的交点, α 为斜坡上升方向 (PC 方向) 的方位角 (从太阳方向顺时针旋转), β 为斜坡倾斜角, Z_x 、 Z_y 分别为斜坡倾斜度的两个分量, ω 为太阳光线入射海洋表面微元的入射角。

根据太阳耀光的几何关系, 可以得到以下关系式^[1]:

$$\cos \alpha = -\frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s + \sin \theta_v \cos \varphi_v}{2 \cos \omega \sin \beta}, \quad (5)$$

$$\sin \alpha = -\frac{\sin \theta_s \sin \varphi_s + \sin \theta_v \sin \varphi_v}{2 \cos \omega \sin \beta}, \quad (6)$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \theta_s + \cos \theta_v}{2 \cos \omega}. \quad (7)$$

结合式 (4), 斜坡倾斜度的两个分量可以表示为

$$\begin{cases} Z_x = \frac{\partial Z}{\partial X} = \frac{AA'}{PA'} = \sin \alpha \tan \beta = \frac{-\sin \theta_v \sin(\varphi_s - \varphi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \\ Z_y = \frac{\partial Z}{\partial Y} = \frac{BB'}{PB'} = \cos \alpha \tan \beta = \frac{\sin \theta_s + \sin \theta_v \sin(\varphi_s - \varphi_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \end{cases} \quad (8)$$

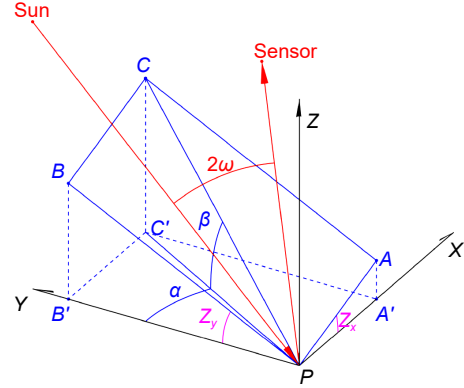


图 1 太阳耀光几何
Fig. 1 Sun glint geometry

将以太阳指向为初始坐标系换算到以风向为观测主平面的坐标系, 即将坐标系 $(P; X, Y, Z)$ 旋转至坐标系 $(P; X', Y', Z')$, 使得 PY' 指向风向, PZ' 指向天顶, 旋转角度为 $\chi = \varphi_s - \varphi_w$, 其中 φ_w 为风向方位角^[15]。在这个新坐标系下, 斜坡倾斜度的两个分量为

$$\begin{cases} Z'_x = \cos(\chi)Z_x + \sin(\chi)Z_y \\ Z'_y = -\sin(\chi)Z_x + \cos(\chi)Z_y \end{cases} \quad (9)$$

在实际观测中, 大量波浪微面元的朝向分布将呈现与观测方向相关的二维高斯概率分布, Cox 和 Munk 在航飞数据的统计基础上使用 Gram-Charlier 展开式将这种概率分布表示为解析形式:

$$P(Z'_x, Z'_y) = \frac{1}{2\pi\sigma'_x\sigma'_y} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2}C_{21}(\xi^2 - 1)\eta - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^3 - \eta) + \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1) \cdot (\eta^2 - 1) + \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) \right\}, \quad (10)$$

式中: $\xi = Z'_x/\sigma'_x$, $\eta = Z'_y/\sigma'_y$, σ'_x 和 σ'_y 分别为 Z'_x 和 Z'_y 的均方根; C_{21} 、 C_{03} 、 C_{40} 、 C_{22} 、 C_{04} 是和风速有关的系数。

通过式 (1) 和式 (10) 可以计算特定几何条件下的偏振方向反射率^[16], 即在特定太阳几何和观测几何下, 耀光偏振反射率 $\rho^p_{\text{glint}}(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ 为

$$\rho^p_{\text{glint}}(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{\pi P(Z'_x, Z'_y) R^p(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v \cos^4 \beta}. \quad (11)$$

太阳耀光的偏振度 DOLP (degree of linear polarization) 为

$$DOLP = \frac{|\rho_{\text{glint}}^p - \rho_{\text{glint}}^s|}{\rho_{\text{glint}}^p + \rho_{\text{glint}}^s}, \quad (12)$$

式中: ρ_{glint}^p 为偏振方向平行于入射面的偏振方向反射率, ρ_{glint}^s 为偏振方向垂直于入射面偏振方向反射率, 两者可以通过对偏振反射系数 R^p 中的 n 参数取特定值计算得到。

在实际测量过程中, 探测器接收到的总辐射并不全来自太阳耀光, 还来自大气分子散射辐射、气溶胶散射辐射以及白沫辐射等^[17]。由于太阳耀光具有方向性, 将海面分为耀光区和非耀光区。在耀光区中, 太阳耀光的辐射强度远超上述其他辐射。在实际计算中, 也仅对太阳耀光区进行耀光的偏振特性计算。太阳耀光角 θ_{glint} ^[18] 可以用于太阳耀光区的判断, 耀光角的定义如式 (13) 所示。在 MODIS 的海洋耀光检测采用 40°经验值法进行判断, 耀光角小于 40°的区域被判断为耀光区^[18]; POLDER3 在业务化处理时采用 30°经验值判断^[19]; OGDD 模型的耀光角临界值以 [20°, 40°] 为参考进行动态调整^[17]。本设计采用经验值法进行判断, 将耀光角小于 30°的区域判断为耀光区, 进行耀光理论偏振度计算。

$$\theta_{\text{glint}} = \arccos(\cos \theta_s \cos \theta_v - \sin \theta_s \sin \theta_v \cos |\varphi_s - \varphi_v|). \quad (13)$$

2.2 测量方式

在光学遥感中, 通常使用 Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 来描述矢量光辐射的偏振态。由于地物反射时太阳光中的圆偏振分量 V 很小, 一般可以忽略不计^[20]。利用 0°、60°和 120°的相对检偏角度, 测得三个偏振通道的 DN 值, 使用以下公式计算入射光的 Stokes 参量:

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} I_{\text{in}} \\ Q_{\text{in}} \\ U_{\text{in}} \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \begin{bmatrix} (DN1 - C)/(AT) \\ (DN2 - C)/(AT) \\ (DN3 - C)/(AT) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: \mathbf{S}_{in} 为入射光的 Stokes 矢量; \mathbf{G} 为大气校正仪系统的定标穆勒矩阵^[21], 如式 (15) 所示; $DN1$ 、 $DN2$ 、 $DN3$ 分别为 3 个通道的 DN 值; AT 为包含绝对辐射定标系数与相对辐射系数的合成参量定标系数; C 为本底暗电流。

$$\begin{cases} \alpha_1 - \phi = \beta_1 \\ \alpha_2 - \phi = \beta_2 \\ \alpha_3 - \phi = \beta_3 \end{cases},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 + \varepsilon \cos(2\beta_1) & \varepsilon + \cos(2\beta_1) & \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin(2\beta_1) \\ 1 + \varepsilon \cos(2\beta_2) & \varepsilon + \cos(2\beta_2) & \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin(2\beta_2) \\ 1 + \varepsilon \cos(2\beta_3) & \varepsilon + \cos(2\beta_3) & \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin(2\beta_3) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: ε 为系统起偏度, 默认为 0; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为 3 个通道的线偏振片的方位角; ϕ 为仪器坐标系下像素方位角。

最后使用 Stokes 矢量表示光的线偏振度 DOLP 和偏振方位角 AOP (azimuth angle of the polarization), 如式 (16) ~ (17) 所示:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (16)$$

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (17)$$

2.3 抑制效果分析

大气校正仪采用转轮分时的方式进行多个通道的成像, 一圈总耗时约 5 s, 而单通道的成像时间约为 0.4 s, 670 nm 波段三个通道在位置上相邻, 时间间隔为 1.2 s。采用 6S 模型^[15] 进行仿真分析, 以世界协调时 (universal time coordinated, UCT) 2 月 14 日 6 点、观测点东经 115°、北纬 15°、观测天顶角 40°、观测方位角 30°为例, 此时太阳天顶角为 39.32° 太阳方位角为 214.21°, 6S 模型计算太阳耀光 DOLP 为 0.694, AOP 为 74.54°。根据时间上太阳几何和观测几何的变化率, 可以求出偏振度的变化率为 -0.002 min^{-1} , 偏振角的变化率为 $0.004^\circ/\text{s}$ 。由于偏振角变化很小, 可以忽略时间上偏振态短时变化引入的偏差。

在耀光区中, 太阳耀光的偏振度在 [0,1] 之间均有分布, 但主要集中在 0.5 以上^[22], s 光分量通常大于 p 光分量。图 2 显示在风速 4.1 m/s、相对方位角 160°情况下, 太阳耀光偏振度和偏振角与太阳天顶角、观测天顶角的关系。

图 3 展示了平行偏振片与旋转至特定角度 (垂直于太阳耀光偏振方向) 的偏振片抑制太阳耀光的效果 (去除的太阳耀光强度/入射的太阳耀光强度) 百分比对比。结果表明, 当太阳天顶角较小时, 两者抑制效果相差不大。当太阳天顶角大于 30°时, 特定角度的偏振片显示出较大的抑制效果提升, 能够降低额外 2% 至 6% 的太阳耀光。这种提升进一步增大了传感器信号中有效信号的比例, 有利于提高信息提取的精度。

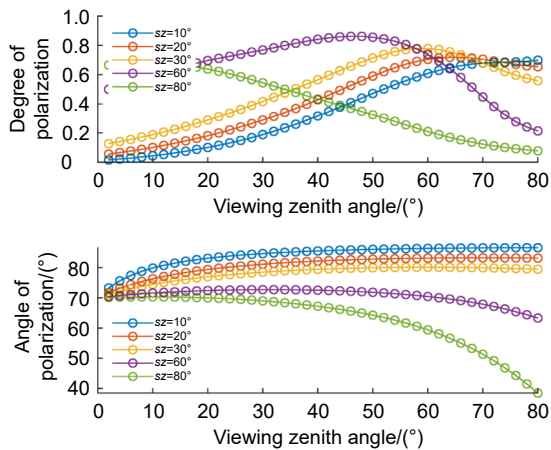


图 2 在不同太阳天顶角下, 太阳耀光偏振度和偏振角与观测天顶角的关系

Fig. 2 The relationship between the degree of polarization and angle of polarization and observed zenith angle at different solar zenith angles

3 系统设计

3.1 数据预处理

耀光区的偏振辐射数据有可能会受到云像元的干扰进而导致耀光角度计算的结果不正确, 太阳光在大气传输过程中也会因为大气的散射、折射和吸收作用而产生一定的偏振变化^[23]。故而需要根据式 (12) 计算太阳耀光的理论偏振度, 并将其与实测值进行比较, 从而剔除受云影响较大的像元数据。由于直接计算太阳耀光理论偏振度所需的时间和资源消耗过高, 采用 6S 模型^[15] 建立查找表, 利用多维插值方法计算理论值。这样既能大幅降低运算时间, 又能将资源消耗控制在可接受范围内。

太阳耀光的计算受到多种因素的影响, 包括太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角、风速、风向方位角等。每个参数的增加都会导致查找表的大小成倍扩大。鉴于 FPGA 内部块随机存储器 (block random access memory, BRAM) 资源有限, 选择了太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角 (太阳方位角与观测方位角的差) 这三个关键参数进行计算。同时对其余参数进行时间和空间统计, 以得出平均值作为查找表的输入。建表规则如表 1 所示。

3.2 系统架构设计

根据太阳耀光的计算原理, 在 FPGA 中设计了太阳耀光计算系统, 如图 4 所示。该系统主要分为两个模块, 模块 1 用于接收和筛选大气校正仪传输过来的

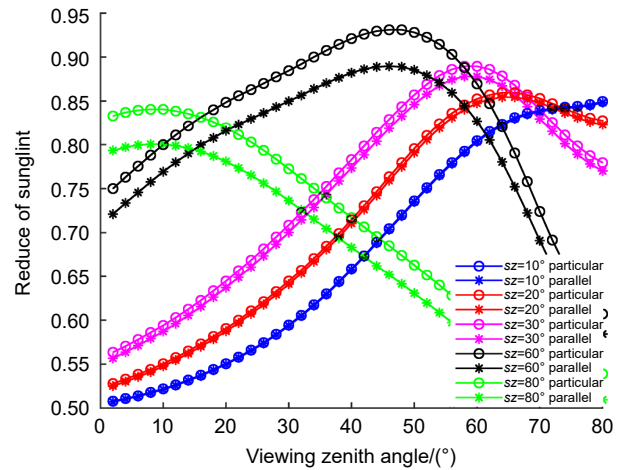


图 3 平行偏振片和特定角度偏振片抑制效果对比
Fig. 3 Comparison of suppression effects between parallel polarizers and specific angle polarizers

图像数据, 模块 2 则根据这些图像数据计算耀光偏振特性。模块 2 细分为 4 个子模块: 模块 2.1 计算耀光角, 对耀光区进行判断; 模块 2.2 计算太阳耀光的理论偏振度; 模块 2.3 计算太阳耀光的实际偏振度; 模块 2.4 将理论与实际偏振度进行对比较, 并计算出太阳耀光的实际偏振角。

表 1 查找表规则

Table 1 Ruler of the lookup table

	Start	End	Step	Average
Solar zenith	0°	80°	8°	
View zenith	0°	80°	5°	
Differentials azimuth	0°	360°	10°	
Wind speed				4.1 m/s
Wind azimuth				90°

通过对计算流程和计算公式的分析, 发现其中涉及到矩阵、三角函数和幂函数等复杂运算, 这些是整个系统主要的运算资源和时间消耗。虽然 Xilinx 中提供了 Multiplier IP 和 Cordic IP 能够直接进行上述运算, 但使用纯硬件语言如 Verilog 开发过于复杂。因此, 选择使用高层次综合工具 (High-Level Synthesis Tool, HLS) 对模块 2.1、2.2、2.3 和 2.4 进行设计和优化, 将其封装为 HLS IP 模块, 最后使用 Verilog 语言将各 IP 串联, 实现计算结果的求解, 其状态机如图 5 所示, 具体步骤如下:

1) FPGA 在上电后进入空闲 (Idle) 状态, 对各参数进行初始化操作, 之后等待探测器数据标志信号 (Data flag)。

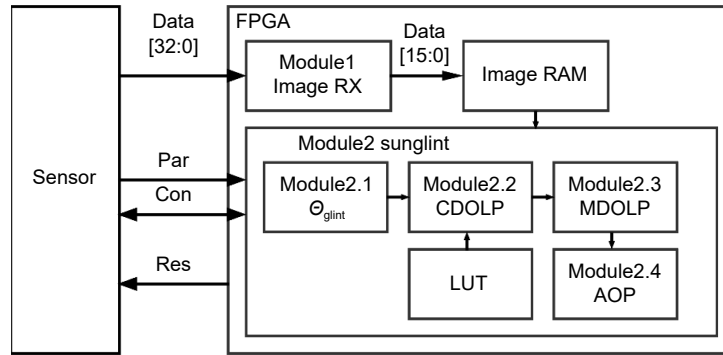


图 4 计算系统内外信息流图

Fig. 4 System information flow diagram

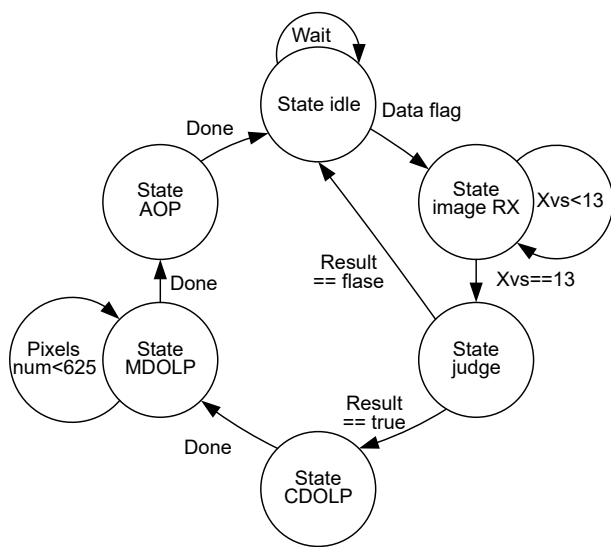


图 5 状态机图

Fig. 5 Finite-state machine

2) FPGA 在接收到探测器数据标志信号后, 从空闲状态切换至图像接收 (Image RX) 状态, 接收、筛选并存储探测器发送过来的图像数据。由于校正仪探测器发出的数据包包括一次成像的所有数据, 并且每个数据信号是由两个相邻像元合并输出。为实现单个 Data 数据的拆分, 使用模块 1 将其分割成两个像元数据。通过使用帧信号 (Xvs)、行信号等标识信号, 可以提取 670 nm 波段三个偏振通道的中心 25×25 像元区域图像数据, 并存储在 FPGA 内部的 RAM 中。

3) FPGA 在接收完探测器数据后, 从图像接收状态切换至耀光区判断 (Judge) 状态。根据式 (13) 计算太阳耀光角 θ_{glint} , 并使用经验值法判断图像区域是否在耀光区中, 不在则切换回空闲状态, 等待下次数据标志信号。

4) FPGA 在判断图像区域在耀光区后, 从耀光区

判断状态切换至理论耀光偏振度计算 (CDOLP) 状态。根据太阳天顶角 θ_s , 观测天顶角 θ_o , 相对方位角 $\varphi_s - \varphi_o$, 使用查找表的方式, 通过三维线性插值, 计算出理论偏振度 CDOLP。

5) FPGA 在计算完理论偏振度后, 从理论耀光偏振度计算状态切换至实际耀光偏振度计算 (MDOLP) 状态。根据式 (14)、(16) 计算出每个像元实测偏振度 MDOLP, 并将其与 CDOLP 进行比较。通过阈值法, 去除因为受云层影响较大而与理论值相差超过 0.05 的像元。

6) FPGA 在计算完实际偏振度后, 从实际耀光偏振度计算状态切换至实际耀光偏振角计算 (AOP) 状态。首先对受到云层的像元个数进行判断, 若大于一定数值, 则此区域受云层影响较大, 向主控制单元返回判断结果; 相反, 则根据式 (17) 计算各个符合条件的像元耀光偏振角。随后, 求出耀光偏振度和偏振角的均值, 并将其发送至主控制单元。

3.3 数据类型选择

FPGA 与 CPU 不同, 它没有专门用于浮点运算的浮点运算单元 (floating-point unit, FPU), 但 V5 系列内部集成了定点型数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 用于加减乘运算。虽然可以采用映射的方式, 使用 DSP 和查找表 (look up table, LUT) 模拟浮点运算, 但与 FPU 相比, 其运算速度会显著降低, 并且会额外消耗大量的 DSP、触发器 (flip flop, FF) 和 LUT 资源。FPGA 内部的 DSP48E 是一个 25×18 位的乘法器, 为了兼顾精度和资源效率, 采用 32 位有符号定点数形式处理, 其中小数部分占 16 位。对于基本运算形式 $a \times b + c$, 浮点数和 32 位定点数的资源消耗比较如表 2 所示。

表 2 两种数据类型运算资源消耗对比
Table 2 Performance comparison of two datatype

	Latency	DSP48E	FF	LUT
FLOAT	6	6	840	1182
AP_FIXED<32,16>	0	3	0	76

3.4 硬件加速

大气校正仪为满足数据处理的实时性需要, 只处理了 320×267 大小的图像数据中的 25×25 大小数据。考虑未来更多在轨高性能计算的需求, 需要提高其星上计算性能。

星上计算性能依赖于硬件能力, 如处理器频率、运算能力和外围设备等。然而, 星上电子元器件容易受高能粒子的干扰, 可供选择的处理器较少, 同时增加外围设备或者提升处理单元也会极大的增加成本开销。与 CPU 和单片机等处理器不同, FPGA 可以利用并行加速^[24]来加快数据处理速度, 同时通过自由设置长度的定点数进行数学运算取得在精度和资源消耗的平衡。

通过对整个计算流程的分析可知 625 组像元数据的偏振角计算过程中有大量的乘法和三角函数运算, 占用了大量时间, 需进行硬件加速设计。

3.4.1 三角函数加速

当前处理器进行复杂运算时, 通常将其通过各种数学变换近似为多项式运算, 如 \sin 函数可使用泰勒展开为

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (18)$$

泰勒展开中会大量使用到乘除运算, 同时考虑到计算精度, 往往需要展开到 4 阶以上, 在 FPGA 中硬件资源消耗较多且非常的耗时。CORDIC 算法^[25]可以仅使用加法、减法和移位来实现复杂函数等的计算, 容易通过纯硬件来实现, 而且能够提高运算速度。CORDIC 算法有旋转和向量两个模式, 分别可以在圆坐标系、线性坐标系和双曲线坐标系使用。下面以旋转模式的圆坐标系为例计算 \sin 函数。

在笛卡尔坐标系中, 点 (x_i, y_i) 旋转 θ^i 角度后到点 (x_{i+1}, y_{i+1}) 有如下关系:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \cos \theta^i - y_i \sin \theta^i \\ y_{i+1} = x_i \sin \theta^i + y_i \cos \theta^i \end{cases} \quad (19)$$

提取因子 $\cos \theta^i$, 使 $\tan \theta^i = 2^{-i}$, 即单次旋转特定角度, 多次旋转后接近真实角度。这样将旋转运算简化为数据移位, 加法运算和一步乘法运算, 并且引入角

度累加器 z 用来存储每次迭代过程中累加的旋转角度, 其中 d_i 为旋转方向, 逆时针为+1, 顺时针为-1, 则有:

$$\begin{cases} x_{i+1} = \frac{1}{\sqrt{1+2^{-2i}}} (x_i - d_i y_i 2^{-i}) \\ y_{i+1} = \frac{1}{\sqrt{1+2^{-2i}}} (y_i + d_i x_i 2^{-i}) \\ z_{i+1} = z_i + d_i \theta^i \end{cases} \quad (20)$$

那么在固定迭代次数的情况下, $x_i^2 + y_i^2$ 的值为固定值。取初始 x_0 为特定的补偿值, y_0 为 0, 令其最终结果 $x_i^2 + y_i^2$ 的值为 1, 那么此时 x_i, y_i 分别为对应 \sin, \cos 的值, 这样将乘法运算也省略掉。

其中不同迭代次数的补偿值和旋转角度预先计算并储存在片上 BRAM 中, 通过查表使用, 如表 3 所示。

表 3 CORDIC 算法迭代因子
Table 3 CORDIC algorithm iteration factor

i	$\tan \theta$	θ	Iteration factor
0	1	45	0.70711
1	0.5	26.56505	0.63246
2	0.25	14.03624	0.61357
3	0.125	7.12502	0.60883
4	0.0625	3.57633	0.60765
5	0.03125	1.78991	0.607352
6	0.015625	0.89517	0.607278
...

表 4 给出使用 CORDIC 迭代次数 12 次, HLS 自带的 \sin 函数, 泰勒 4 阶展开, 三种方式计算 $\sin 30^\circ$ 所消耗的资源使用情况和时间消耗和吞吐能力, 根据 Latency 和 Interval 的大小, 可以得出 CORDIC 算法时间消耗小, 吞吐能力强。

表 4 三种算法性能与资源消耗比较

	Latency	Interval	DSP48E	FF	LUT
CORDIC	4	1	0	442	3640
sin	39	39	3	226	1119
Taylor	36	36	6	2942	4678

3.4.2 HLS 优化

Vivado HLS 提供了多种指令来优化生成的 Verilog 代码, 以实现不同的 RTL 电路。可以根据不同的需求选择合适的优化指令, 以实现时间和资源消耗的平衡。

在整个计算流程中, Pipeline、Dataflow 和 Unroll 指令可以用于优化数据吞吐量和减少时间消耗。默认情况下, HLS 遵循 C 语言的逻辑顺序, 依次调用函

数体和函数体内部的处理流。Dataflow 指令使 HLS 能够在上一个函数体尚未完成所有操作时调用下一个函数主体，而 Pipeline 指令使 HLS 能够在循环或函数中同时执行操作。这两条指令适用于不同的范围，但都允许并行操作，从而减少了时间消耗并提高了 RTL 的吞吐量。HLS 中的循环在默认情况下保持完全折叠。使用 Unroll 指令展开循环并在 RTL 设计中创建多个副本，以便循环迭代的全部或部分并行进行，从而提高数据访问和吞吐量，并减少时间消耗。表 5 展示了进行指令优化前后各模块的资源消耗对比。

表 5 优化前后性能与资源消耗比较

Table 5 Performance and resource comparison before and after optimization

	Latency		FF		DSP48E	
	Before	After	Before	After	Before	After
GHT	181	109	3317	4883	12	4
CDOLP	104	69	1852	3430	0	0
MDOLP	1397	368	8191	8729	14	20

4 实验验证

为了验证系统计算太阳耀光的有效性和实时性，在实验室搭建了偏振探测实验装置，如图 6 所示。使用可调偏振方位角的线偏振光源来代替耀光光源，并



图 6 线偏光源和大气校正仪探头整机

Fig. 6 Line biased light source and atmosphere calibration instrument probe

使用大气校正仪进行测量。

定标后的系统测量矩阵如式 (21) 所示：

$$S_{in} = G^{-1} \begin{bmatrix} (DN1 - C)/(AT) \\ (DN2 - C)/(AT) \\ (DN3 - C)/(AT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.338 & 0.327 & 0.336 \\ 0.306 & 0.358 & -0.664 \\ -0.588 & 0.570 & 0.017 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (DN1 - 400)/(513.08) \\ (DN2 - 400)/(513.08) \\ (DN3 - 400)/(513.08) \end{bmatrix} \quad (21)$$

对 0° 线偏振光源进行测量，计算结果如表 6 所示。

其偏振方位角计算结果存在系统偏差，重新校准线偏振光源 0° 方向，校准结果如式 (22) 所示：

$$S_{in} = \begin{bmatrix} 0.339 & 0.327 & 0.335 \\ 0.088 & 0.532 & -0.620 \\ -0.656 & 0.413 & 0.243 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (DN1 - 400)/(513.08) \\ (DN2 - 400)/(513.08) \\ (DN3 - 400)/(513.08) \end{bmatrix} \quad (22)$$

通过调整偏振光源的偏振方位角 (angle of light) 输出，记录下 670 nm 波段的三个检偏图像的均值，同时检测 FPGA 程序输出的耀光偏振度和偏振角，并对其计算结果计算标准差。实验测试结果如表 7 所示，可知 FPGA 运行结果的变化趋势与线偏振光方位角的变化趋势一致，相关系数大于 0.99；最大偏振度偏差小于 0.03，最大偏振角偏差小于 0.5°。

表 6 0° 实验测试结果

Table 6 0° experiment results

Parameter	Value
Mean DN1	3717
Mean DN2	5562
Mean DN3	740
DOLP	0.967
Standard deviation of DOLP	0.023
AOP	4.377°
Standard deviation of AOP	0.112

表 7 实验测试结果

Table 7 Experiment results

Angle of light	MEAN DN1	MEAN DN2	MEAN DN3	DOLP	Standard deviation of DOLP	AOP	Standard deviation of AOP
30°	1127	5937	3002	0.971	0.003	30.10	0.098
60°	728	3687	5612	0.976	0.002	60.45	0.126
90°	2963	1102	5982	0.974	0.003	90.35	0.100
120°	5569	734	3708	0.970	0.002	119.94	0.120
150°	5972	2971	1104	0.975	0.003	150.20	0.107
180°	3727	5559	735	0.973	0.002	180.30	0.110

5 结论

为了适应光学遥感卫星实时太阳耀光抑制的需求, 利用星载大气校正仪偏振探测能力和 FPGA 计算平台, 设计了一种星载实时耀光偏振角测量系统。首先介绍了太阳耀光的理论模型和测量原理, 然后基于理论分析介绍了在 FPGA 上实现该算法的具体过程。使用 HLS 开发工具进行资源和时间消耗的优化, 并在实验室内验证了系统正确性和性能。实验结果表明, 该系统偏振方位角计算时间为 19.47281 ms, 计算误差小于 0.5°, 资源使用率 41%, 满足系统设计要求。

参考文献

- [1] Kay S, Hedley J D, Lavender S. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths[J]. *Remote Sens*, 2009, 1(4): 697–730.
- [2] Wang M H, Bailey S W. Correction of sun glint contamination on the SeaWiFS ocean and atmosphere products[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(27): 4790–4798.
- [3] Mobley C D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(15): 4828–4849.
- [4] Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface[J]. *Opt Express*, 2016, 24(14): A1045–A1068.
- [5] Fougnie B, Frouin R, Lecomte P, et al. Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(18): 3844–3856.
- [6] Liu Z G, Zhou G H. Polarization of sun glint[J]. *J Infrared Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 362–365.
刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(5): 362–365.
- [7] Zhao H J, Ji Z, Zhang Y, et al. Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in sun glint[J]. *Opt Express*, 2016, 24(15): 16396–16409.
- [8] Avrahamy R, Milgrom B, Zohar M, et al. Improving object imaging with sea glinted background using polarization method: analysis and operator survey[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2019, 57(11): 8764–8774.
- [9] Zhang W G. Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface[J]. *Chin Opt*, 2018, 11(2): 231–236.
张卫国. 海面太阳耀光背景下的偏振探测技术[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 231–236.
- [10] Zhu H Q, Qu H S. Adaptive suppression system of sea background flare[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, 42(12): 1201006.
朱鹤骞, 曲宏松. 海面背景耀光的自适应抑制系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201006.
- [11] Wang M S, Qiu S, Jin W Q, et al. Automatic suppression method for water surface glints using a division of focal plane visible polarimeter[J]. *Sensors*, 2023, 23(17): 7446.
- [12] Yu X Y. Design of sCMOS imaging system for space-borne polarization spectral camera[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023: 1–67.
于新宇. 星载偏振光谱相机sCMOS成像系统设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023: 1–67.
- [13] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. 5th ed. New York: Pergamon Press, 1975.
- [14] Reda I, Andreas A. Corrigendum to “Solar position algorithm for solar radiation applications” [Solar Energy 76 (2004) 577–589][J]. *Sol Energy*, 2007, 81(6): 838.
- [15] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter[J]. *J Opt Soc Am*, 1954, 44(11): 838–850.
- [16] Kotchenova S Y, Vermote E F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(20): 4455–4464.
- [17] Chen Z T, Sun X B, Wang J F, et al. Dynamic detection of ocean glint from near-infrared polarized radiation satellite data[J]. *J Remote Sens*, 2019, 23(2): 215–229.
陈震霆, 孙晓兵, 汪俊锋, 等. 近红外偏振辐射卫星数据的海洋耀光动态检测[J]. *遥感学报*, 2019, 23(2): 215–229.
- [18] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *J Atmos Sci*, 2005, 62(4): 947–973.
- [19] Toubbe B, Bailleul T, Deuze J L, et al. In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the Sun's glitter[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37(1): 513–524.
- [20] Bicheron P, Leroy M, Hautecoeur O, et al. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of Earth reflectances (POLDER) instrument[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1997, 102(D24): 29517–29528.
- [21] Qian H H. Laboratory full field of view polarization calibration of directional polarimetric camera[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 1–100.
钱鸿鹄. 多角度偏振成像仪实验室全视场偏振定标[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 1–100.
- [22] Hou M Y, Li Z Q, Xie Y S, et al. Research on spectral feature cloud detection method of directional polarimetric camera on Chinese satellite[J]. *J Atmos Environ Opt*, 2022, 17(6): 598–612.
侯梦雨, 李正强, 谢一淞, 等. 国产卫星多角度偏振传感器的光谱特征云检测方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2022, 17(6): 598–612.
- [23] Cheng Q, Gao X J, Gao J, et al. A generative method for atmospheric polarization modelling based on neighborhood constraint[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(6): 210423.
程前, 高欣健, 高隽, 等. 基于邻域约束的大气偏振模式生成网络[J]. *光电工程*, 2022, 49(6): 210423.
- [24] Kastner R, Matai J, Neuendorffer S. Parallel programming for FPGAs[Z]. arXiv: 1805.03648, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.03648>.
- [25] Volder J E. The CORDIC trigonometric computing technique[J]. *IRE Trans Electron Comput*, 1959, EC-8(3): 330–334.

作者简介



李宇豪 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为偏振传感器数据处理技术。

E-mail: liyuhao@mail.hfut.edu.cn



【通信作者】陈斐楠 (1986-), 男, 博士, 现就职于中国科学院安徽光机所光学遥感中心, 主要从事偏振遥感数据预处理, 开展轨辐射、偏振定标等研究工作。

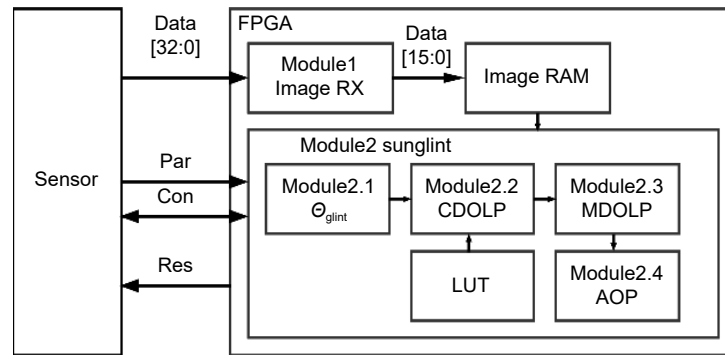
E-mail: feinan123@aiofm.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Design and implement of a space-borne sun glint polarization parameter computing system

Li Yuhao^{1,2}, Ji Feng¹, Qiu Zhenwei², Chen Feinan^{2*}, Li Zhuoran², Chi Gaojun², Chen Jingjing¹,
Hu Yadong², Li Mengfan²



System information flow diagram

Overview: In passive optical remote sensing, the phenomenon of sun glint presents a substantial challenge in the acquisition and processing of high-quality images. Sun glint is the specular reflection from surfaces like water. Water bodies are characterized by low reflectivity, which classifies them as dark targets within the context of remote sensing. The radiation of sun glint is usually dozens of times higher than the target's radiation, and is easy to cause sensor saturation, leading to serious interference with the detection target. The current methods for suppressing solar glint in remote sensing imagery are mainly conducted on the ground. However, these approaches are often reactive rather than preventive and may not be suitable for real-time applications. According to Fresnel's law, the vertical component of sun glint is usually greater than the parallel component. In space, to mitigate this issue, a polarizer is typically incorporated in front of the remote sensor, leveraging the linear polarization characteristics of sun glint. The suppression effects depend on the relative position of the sun and the remote sensor, as well as the directions of polarizers. With the rapid development of satellite technology, the traditional method of installing parallel linear polarizers is difficult to meet our requirements. So, to suppress sun glint accurately and timely, we introduce a novel onboard system for the real-time computation of Sun glint polarization parameters, devised specifically for a spaceborne atmospheric correction instrument. Utilizing three channel polarization images (at 0° , 60° , and 120°) in the 670 nm band of the space-borne atmospheric correction, we calculate the sun glint parameters and compare them against the 6S radiation transfer model, excluding image pixels heavily influenced by the cloud. The system is implemented using the V5 series Field Programmable Gate Array (FPGA) as the hardware platform, and the High-Level Synthesis Tool (HLS) as the software platform. By utilizing the Cordic algorithm, converting data to appropriate datatypes, and implementing pipeline unrolling methods, we achieve a balanced trade-off between speed and resource allocation. A simple experiment was built to verify the system in the laboratory. The experiments performed that the calculation deviation is within 0.5° , calculating the 25 pixels \times 25 pixels data costs 19.47281 ms in 100 MHz clock, and the highest resource utilization rate accounts for 41%, meeting the requirements of the accuracy, real-time performance, and resource consumption.

Li Y H, Ji F, Qiu Z W, et al. Design and implement of a space-borne sun glint polarization parameter computing system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(4): 240002; DOI: [10.12086/oe.2024.240002](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240002)

Foundation item: Project supported by Equipment Pre-research Project (305090306), and Dreams Foundation of Jianghuai Advance Technology Center Fund (2023-ZM01K011)

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; ²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

* E-mail: feinan123@aiofm.ac.cn